

현장 시료의 CO₂/염수 상대유체투과도 거동 특성

정구선¹⁾³⁾ · 허대기¹⁾²⁾ · 기세일^{3)*} · 박용찬⁴⁾

Relative Permeability Characteristics for CO₂ and Brine in In-situ Core Samples

Gusun Jeong, Dae-gee Huh, Seil Ki*, and Yongchan Park

(Received 4 May 2017; Final version Received 15 December 2017; Accepted 22 December 2017)

Abstract : Understanding of the relative permeability for CO₂/brine system is essential for the successful CO₂ storage in geological formation. This paper presents experimental measurements of CO₂/brine relative permeability in paaratte and Gorae 1-1 samples obtained from Australian Otway basin and Korea continental shelf, respectively. Both samples were fired to make flow efficient by reducing fine particle's migration, which cause flow inefficiency by 2-3 times. The results show typical features of CO₂/brine system with high irreducible brine saturation (over 40%) and low CO₂'s end-point relative permeability (below 0.2). Furthermore, irreducible brine saturation of Gorae 1-1 sample is higher than that of the paaratte sample, due to difference in water-wet tendencies. It expects a more conservative approach in estimating the CO₂'s injectable amount into the formation. And, by low absolute permeability and capillary dominant flow, injecting to the Gorae 1-1 formation with high flowrate is recommendable in actual operation.

Key words : CO₂ storage, CO₂/brine relative permeability, Irreducible brine saturation, Gorae 1-1, Paaratte

요 약 : 성공적인 CO₂ 지중저장 사업을 위해 CO₂/염수 상대유체투과도를 이해하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 호주 오프웨이 분지 paaratte 지층의 시료와 국내 대륙붕 고래 1-1공에서 채취한 시료를 대상으로 CO₂/염수 상대유체투과도를 측정하였다. 두 시료 모두 미세 입자 이동의 영향을 줄이기 위해 열처리를 수행하였고, paaratte 지층의 시료에서는 실제로 압력차가 2-3배 개선되는 결과를 보여주었다. CO₂/염수 상대유체투과도 측정 결과, 두 시료 모두 0.2 이하의 낮은 CO₂ 끝점 상대유체투과도와 약 40% 이상의 높은 최소잔류수포화율이 관측된다. 이는 물/오일 시스템과 상당히 대비되며, 고래 1-1공 시료의 최소잔류수포화율은 수습윤성으로 인해 paaratte 지층보다 높게 측정되었기 때문에 CO₂ 주입량 산정 시, 보다 보수적으로 접근해야 한다. 이와 더불어 고래 1-1공 시료에서는 낮은 절대유체투과도와 모세관 지배유동으로 인해 비효율적인 CO₂ 주입이 예상되므로 CO₂ 주입 유량을 높게 유지하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

주요어 : CO₂ 지중저장, CO₂/염수 상대유체투과도, 최소잔류수포화율, 고래 1-1공, Paaratte 지층

서 론

CO₂ 지중저장(Carbon Capture and Storage, CCS)은 산업적으로 배출된 CO₂를 포집하여 대상 지층에 저장하는 기술이다. 이 기술은 막대한 CO₂양의 처분이 가능하고 현장 적용성이 높아 국제사회에서 효과적인 CO₂ 감축방안 중 하나

로 인정받고 있다(IPCC, 2005). CO₂ 저장이 가능한 지질 구조 가운데 대수층은 전 세계 퇴적 분지에 광범위하게 분포하고 있고 저장용량이 막대하므로 가장 적합한 구조가 될 수 있다(Bachu, 2003).

대수층 내 CO₂ 저장용량 산정과 유동 특성 파악에 대한 연구들(Bachu *et al.*, 2007; Bradshaw *et al.*, 2007)이후 CO₂CRC 프로젝트 등의 여러 실증사업들이 수행되고 있다(CO₂CRC, 2017). 국내외 많은 연구기관들은 실증사업에 참여하여 핵심기술을 확보하였고 국내에서도 최근 포항 분지 영일만 인근 지역에 CO₂를 주입하는 소규모 프로젝트가 진행 중이다(Choi *et al.*, 2017).

성공적인 CO₂ 지중저장 사업을 위해 CO₂/염수 상대유체투과도 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. CO₂/염수 상대유체투과도는 CO₂/염수 2상 유동(two-phase flow)에 대

- 1) 과학기술연합대학원대학교 석유자원공학과
- 2) 한국지질자원연구원 석유해저연구본부
- 3) 한국석유공사 E&P 사업본부
- 4) 한국지질자원연구원 전략기술본부

*Corresponding Author(기세일)

E-mail; seil.ki@knoc.co.kr

Address; Exploration and Production Group, 305,
Jongga-Ro, Jung-gu, ULSAN, republic of Korea
(44538)

한 거동 특성과 주입도(injectivity) 및 포획 기작(capillary trapping) 산정, 시뮬레이션 수행 시 입력 변수 등으로 활용될 수 있다. 최근에는 CO₂ 주입을 목적으로 활발한 연구가 진행되고 있으나, 현재로서는 이용 가능한 CO₂/염수 상대유체투과도 측정 자료와 현장 적용 검토 등이 충분하지 않은 실정이다. 특히 CO₂/염수 2상 유동에 대한 기존 연구의 대부분은 점도비, 계면장력 등 유체의 열물성(thermo-physical properties)이 CO₂/염수 상대유체투과도에 미치는 효과만을 주로 검토하고 있다(Bennion and Bachu, 2008; Pini and Benson, 2013).

이와는 달리 물/오일 상대유체투과도는 많은 측정 자료와 함께 실험 조건에 따른 2상 유동 특성, 모델링 등 다양한 연구들이 수행되어 왔다(Fatt and Dykstra, 1951; Burdine, 1953; Corey, 1954, Craig, 1971; Brooks and Corey, 1964). 이 중 Brooks와 Corey(1964)는 식(1)의 Brooks-Corey 모델을 이용하여 암석과 유체의 상호관계를 나타내는 습윤성(wettability)을 Corey 지수로 활용하였다. 식(1)에서 N_w 와 N_{nw} 는 각각 습윤상과 비습윤상의 Corey 지수를 의미한다.

$$k_{rw} = (S_w^*)^{N_w}$$

$$k_{rnw} = (k_{rnw} \text{ at } S_{wirr}) (1 - S_w^*)^2 [1 - (S_w^*)^{N_w}] \quad (1)$$

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wirr}}{1 - S_{wirr}}$$

또한, Craig(1971)는 물·오일 상대유체투과도 실험결과를 바탕으로 습윤성(wettability)을 판단하는 지표들을 제시하였다. 그는 각 지표를 이용하여 습윤성에 따른 상대유체투과도 변화를 파악하였으며, 이를 통해 습윤성이 상대유체투과도에 미치는 효과가 상당함을 보여주었다.

본 연구에서는 두 가지 현장 시료인 호주 오프웨이 분지 paaratte 지층의 시료와 국내 대륙붕 고래 1-1공 시료를 대상으로 CO₂/염수 상대유체투과도를 측정하였고 측정된 결과로부터 Corey 지수값을 제시하였다. 또한 실험 결과를 물·오일 상대유체투과도 연구에서 수행되었던 습윤성 지표와 비교해 CO₂와 염수의 2상 유동 특성을 추정하였고 현장 시료에 CO₂를 주입함에 따라 발생할 수 있는 현상을 사전에 고찰하였다. 이러한 결과들은 실증 사업에 필요한 자료 제공과 더불어 CO₂/염수 2상 유동을 이해하는 데 도움을 줄 것이다.

실험 장비

CO₂/염수 상대유체투과도 측정을 위해 Fig. 1의 장비를 개발하였다. 개발된 장비는 밀폐 순환형(closed looped)으로, 고온·고압 조건에서 CO₂와 염수의 동시 주입이 가능하다. 상대유체투과도 측정 시 온도에 따른 유체의 물성 변화를 제어하기 위해 코어 홀더(core holder)를 대류식 오븐 내

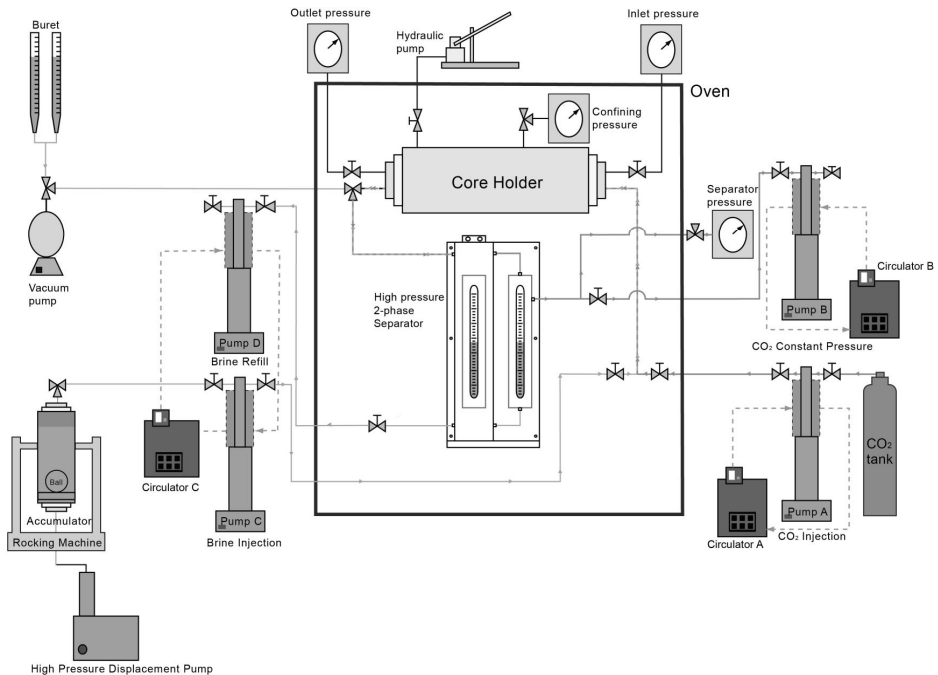


Fig. 1. Experimental apparatus developed for two-phase core flooding experiments.

위치시켜 온도를 일정하게 유지시켰다. 또한 CO₂에 의한 슬리브 팽창(swelling)을 최소화하기 위해 우레탄(urethane) 재질의 슬리브를 사용하였다. 슬리브에 가해지는 봉압(confining pressure)은 수압 펌프(hydraulic pump)에 의해 공극압(pore pressure)보다 약 400 psi 높게 유지함으로써 암석 시료를 통한 CO₂와 염수의 1차원 유동 모사의 정확도를 제고하고자 하였다.

CO₂와 염수는 각각의 Fig. 1의 펌프 A와 펌프 C를 통해 암석 시료로 주입된다. 여기서 염수는 CO₂로 포화된 염수이며, 이를 제조하기 위해 유체 혼합 장비(rocking machine)를 사용하였다. CO₂로 포화된 염수는 CO₂ 주입과정에서 CO₂가 염수에 용해되는 것을 사전에 방지하여 안정적인 비혼합 유동(immiscible flow) 모사와 상대유체투과도 측정을 가능하게 한다(Perrin and Benson, 2010). 유체혼합장비를 통해 제조된 CO₂로 포화된 염수는 펌프 C로 보내져 암석 시료로 주입된다.

암석 시료를 통과한 CO₂와 염수는 고압 2상 분리기(high pressure 2-phase separator)에서 밀도 차에 의해 분리되어 계면을 형성한다. 이 계면의 높이 변화를 통해 암석 시료로부터 생산된 염수의 양을 정량적으로 측정하여 포화율을 결정하였다. 고압 2상 분리기 상부의 CO₂는 실험 압력 조절을 위한 펌프 B로 보내진다. 반면, 하부의 염수는 일정 흡입 유속(constant refill rate)으로 작동하고 있는 펌프 D로 보내진다. 펌프 D는 펌프 C의 주입 유속과 동일하게 작동되어 유동 실험동안 시스템 내 순환되는 염수의 양을 동일하게 만들어 줄 수 있다.

시료 및 사용 유체

실험에 사용된 두 암석 시료는 호주 오프웨이 분지 paaratte 지층의 시료와 국내 대륙봉 고래 1-1공에서 채취한 수평 방향의 플러그 시료(plug sample)이다. Paaratte 지층은 CO₂CRC 실증 사업에서 CO₂ 주입 대상층으로, 이 지층은 절대유체투과도가 양호한 사암과 석회질 이암이 교호하는 특징을 보인다(Geary and Reid, 1998). 고래 1-1공 시료는 사암 시료로서, 가스전 개발 목적으로 가스/물 상대유체투과도가 측정된 바가 있다. 하지만 CO₂/염수의 상대유체투과도는 가스·물 상대유체투과도와 상이한 거동을 보이므로 이에 대한 분석이 필요한 상황이다. 또한 고래 1-1공 시료의

CO₂/염수 상대유체투과도는 국내 대륙봉을 대상으로 CCS 사업 가능성과 사업화 등을 사전에 검토한 기존 연구들(Park *et al.*, 2009; Shinn *et al.*, 2012)의 연장으로서도 의미가 있다.

두 시료에 주입할 유체로, CO₂로 포화된 염수, CO₂가 각각 습윤상(wetting phase) 유체, 비습윤상(non-wetting phase) 유체로 사용되었다. 염수는 paaratte 지층과 국내 대륙봉 지층수 조건에 맞도록 각각 NaCl 0.2 wt %, 2.0 wt %를 직접 제조하여 사용하였다.

실험 방법

전체 실험은 공극률/절대유체투과도 측정, 상대유체투과도 측정이 순차적으로 진행되었으며 각각의 실험 과정은 아래와 같다.

공극률/절대유체투과도 측정

공극률은 암석 시료 총 체적에 대한 공극 체적의 비율을 의미한다. 공극 체적은 Fig. 1의 진공펌프를 이용하여 시료 내부를 24시간 동안 탈기시킨 후, 뷰렛(buret)으로부터 흡입되는 염수의 부피를 통해 결정하였다. 이를 통해 공극률을 결정하였다.

공극 내 유체 유동의 용이도를 나타내는 절대유체투과도는 Darcy 방정식으로부터 계산하였다. 절대유체투과도 측정을 위해 염수를 펌프 C로 일정 유속으로 주입한 뒤, 안정화된 압력차를 이용하여 절대유체투과도를 계산하였다. 절대유체투과도는 상대유체투과도를 계산하는 분모 값으로도 사용된다. Table 1은 각각의 시료에 대한 공극률과 절대유체투과도 측정 결과를 나타낸다.

상대유체투과도 측정

상대유체투과도는 정상 상태(steady state)를 이용하여 측정하였다(Richardson *et al.*, 1952). 이를 위해 CO₂와 염수를 암석 시료에 동시 주입하여 암석 시료 양단의 압력차와 포화율이 변화가 없는 시점에서의 압력차를 Darcy 방정식에 대입하여 유효유체투과도를 계산하였다. 상대유체투과도는 여기서 구한 유효유체투과도와 실험 초기에 측정된 절대유체투과도를 이용하여 도출하였다. 포화율은 앞서 설명한 고압 2상 분리기 내 계면 수위 변화로부터 도출하였다.

Table 1. The results of porosity and permeability measurements

	Paaratte sample	Gorae 1-1
Porosity, fraction	38.3	20.3
Absolute permeability(md)	123	18

실험은 CO₂로 포화된 염수가 암석 시료에 100% 포화된 상태로 시작되며, 총 유량(total flow rate)은 고정된 상태에서 CO₂와 염수의 주입 유속비(fractional flow)만을 변경하였다. 여기서 CO₂ 주입 과정(drainage process)을 모사하기 위해 CO₂의 주입 유속비를 점진적으로 증가시켰다. 총 유량은 실험 제반사항을 고려하여 paaratte 지층의 시료의 경우는 8 cc/min, 고래 1-1공 시료는 4 cc/min으로 설정하였다.

실험 결과 및 토론

본 연구에서 사용한 실험 온도와 압력은 paaratte 지층 시료의 경우 60°C, 2,000 psi, 고래 1-1공 시료는 40°C, 1,500 psi이다. 실험조건에 해당하는 각 유체의 점도와 점도비(viscosity ratio)는 Table 2와 같다(NIST Chemistry WebBook, 2017). 두 유체의 점도비가 상대유체투과도에 미치는 영향은 미미한 것으로 알려져 있으며(Bennion and Bachu, 2005; Jeong *et al.*, 2017), 실제로 두 유체의 점도비는 거의 같으므로, 이로 인한 실험 결과의 영향은 논의에서 제외하기로 한다.

Fig. 2는 CO₂의 주입 유속비가 0.00625에서 측정된 paaratte 지층 시료의 압력차 측정 결과이다. CO₂가 일정한 유속으로 주입되지만 압력차는 상승과 하강이 반복된다. Gray와 Rex(1985)는 지층수의 염도 조건이 변경되거나 지층 내 존재하지 않는 유체가 주입되면 점토광물이 팽창(clay swelling)하거나 미세 입자의 이동(fine migration)이 발생할 수 있다

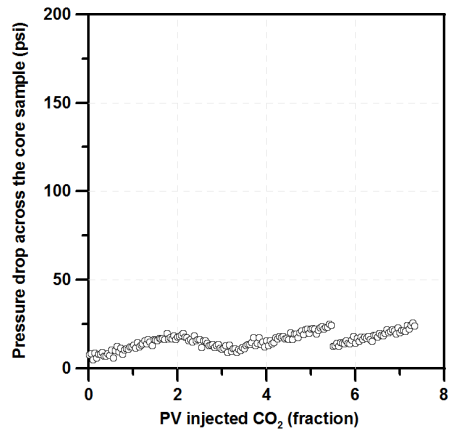


Fig. 2. Initial pressure drop of paaratte sample.

고 언급하였다. Priisholm 등(1987)은 이러한 점토광물의 팽창이나 미세 입자의 이동은 정상상태 유동을 방해하여 투과도 측정의 왜곡을 초래할 수 있다고 언급하였다. 앞서 절대유체투과도 측정 시에는 지층수 염도 조건과 동일한 염수를 사용하여 점토광물의 팽창이나 미세 입자 이동 등의 문제가 발생하지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 3은 paaratte 지층 시료의 X선 회절(X-ray Diffraction) 분석 결과로서, 시료 내 점토광물의 존재를 지시하고 있다. Hayatdavoudi와 Ghalambor(1996), Musharova 등(2012)은 카올리나이트, 미립의 운모류(micas) 등의 미세 점토광물 등은 공극 내 이동하여 지층 손상을 야기할 수 있다고 언

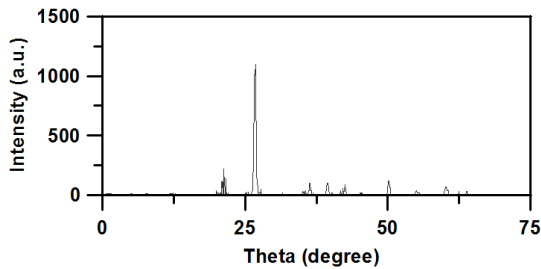


Fig. 3. Summary of mineral identification and quantification for paaratte sample.

Phase	Weight, %	Note
Quartz	62.7	
Plagioclase	3.2	
Kaolinite	8	Clay
K-feldspar	14.9	
Micas	11.1	Clay

Table 2. Fluid viscosities and viscosity ratio at experimental conditions

Rock Sample	Fluid	Viscosity (cp)	Viscosity ratio, $\frac{\mu_{CO_2}}{\mu_{brine}}$
paaratte	Brine	0.47	0.09
	CO ₂	0.04	
Gorae 1-1	Brine	0.63	0.08
	CO ₂	0.05	

급하였다. paaratte 지층은 Crocker 등(1983)과 Ulusay 등(2016)에 의해 평균 공극 크기가 상당히 작은 편(5~10 μm) 이고 미고화된 것으로 알려져 있으며, Fig. 4의 입도분석 결과는 미세 점토광물의 존재(5 μm 이하)를 보여준다. 공극 크기보다 작은 미세 입자가 존재한다는 결과로부터, Fig. 2의 불안정한 압력차는 미세 점토광물이 공극 내 이동한 것으로 추론된다.

열처리 는 점토광물을 제거하여 유체 유동을 안정화시킬 수 있으므로(Ma and Morrow, 1994), 해당 시료를 510°C 에서 17시간 동안 가열한 뒤 Fig. 5(a)의 결과를 취득하였다. Fig. 5(a)는 Fig. 2에 비해 압력차가 약 2~3배 감소하였음을 보여주며 이는 식 (2)에 따라 주입도(injectivity index)가 2~3배 개선되었다는 것을 의미한다. 현장 시료에서 주로 발생하는 상기 문제들로 인해 고래 1-1공 시료 역시 사전 열처리를 수행한 뒤 상대유체투과도를 측정하였다. Fig. 5(b)는 고래 1-1공 시료의 정상상태 유동을 나타낸다.

$$\text{Injectivity index} = \frac{q_{inj}}{\Delta p} = \frac{q_{inj}}{P_{wf} - P_r} \propto \frac{k_a k_{rCO_2}}{\mu_{CO_2}} \quad (2)$$

Fig. 6은 열처리 이후에 측정된 paaratte 지층의 시료와 고래 1-1공 시료의 CO₂/염수 상대유체투과도 결과를 보여준다. 두 시료 모두 기존 문헌들(Bennion and Bachu, 2006; Perrin et al., 2009; Perrin and Benson, 2010)에서 측정된 결과와 유사한 특성을 보인다. 즉, 0.2이하의 낮은 CO₂ 끝점 상대유체투과도와 높은 최소잔류수포화율이 관측된다. 특히 최소잔류수포화율은 paaratte 지층 시료의 경우 39%, 대륙봉 시료의 경우 42%로 측정되었다. 이는 사암을 대상으로 물/오일 상대유체투과도를 측정할 기존 연구에서 최소잔류수포화율이 15~35%인 것에 비해 상당히 높은 편이다(Richardson et al., 1952; Johnson et al., 1959). 이와 같은 높은 최소잔류수포화율은 모세관 압력과 CO₂의 낮은 점도 등으로 설명되며(Krevor et al., 2011), CO₂/염수 상대유체투과도 곡선에서 나타나는 두드러진 특징이다.

한편, 두 시료의 최소잔류수포화율 차이는 두 시료의 습윤 거동(wettability behavior) 차이로 설명 가능하다. Craig (1971)는 물·오일 상대유체투과도 곡선으로부터 암석 시료의 습윤 정도를 파악할 수 있는 지표 제시하였다(Table 3). 그의 결과에 따르면 암석 시료의 수습윤(water-wet) 특성이 강할수록 최소잔류수포화율은 20%보다 크게 나타나고(Criterion 1), 상대유체투과도 곡선들은($k_{rw} = k_{rw}$) 수포화율이 50%보다 높은 점에서 교차한다(Criterion 2). 또한 비습윤상 포화율(S_{nw})에서 습윤상 유체의 상대유체투과도(k_{rw})는 0.3이하의 낮은 값을 보인다(Criterion 3). 그가 제시한 수습윤 특성은 본 연구에서 측정된 CO₂/염수 상대유

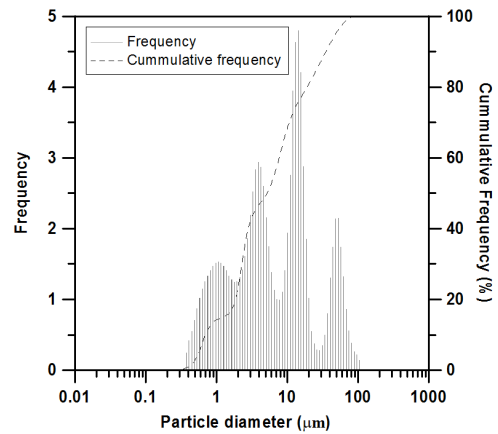


Fig. 4. Particle size distribution for the paaratte sample.

체투과도 곡선과 정성적으로 유사하며, 이를 바탕으로 두 시료의 결과를 비교, 분석할 수 있다.

두 시료의 습윤성을 상대적으로 비교하기 위해 실험 결과를 Fig. 7에 같이 도시하였다. 고래 1-1공 시료의 결과는 paaratte 지층의 시료에 비해 최소잔류수포화율이 높게 나타나고, 교차점에서의 수포화율은 10% 이상 크게 나타난다. 더불어 습윤상 유체인 염수의 상대유체투과도도 낮은 값을 보인다. 이로부터 고래 1-1공 시료는 paaratte 지층의 시료보다 수습윤 특성이 상대적으로 강한 것을 추론할 수 있다. 특히 고래 1-1공 시료에서 측정된 높은 최소잔류수포화율은 저장되는 CO₂ 양($1 - S_{wirr}$)이 작다는 것을 의미하며, 이는 CO₂ 주입량 산정에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 이 지층에 CO₂를 주입한다면 paaratte 지층을 대상으로 CO₂ 지층저장 사업을 수행하고 있는 CO2CRC 프로젝트에 비해 CO₂ 주입양도 보수적으로 산정하는 것이 타당하다.

또한 두 시료의 상대유체투과도 곡선의 오목한 정도는 모세관력 차이로도 설명 가능하다. Dullien(1992)과 Lake 등(2014)은 모세관력에 따른 상대유체투과도의 변화를 Fig. 8과 같이 제시하여 모세관력이 강한 시스템에서 상대유체투과도 곡선의 오목한 정도와 최소잔류수포화율은 크게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 모세관력에 따른 상대유체투과도 변화는 Fig. 6에 적용된 Corey 지수로 설명되며(Table 4) 고래 1-1공 시료에서는 paaratte 지층의 시료보다 높은 Corey 지수로 인해 상대유체투과도 곡선의 오목한 정도가 크게 나타난다. Figs. 6과 8의 정성적인 유사성을 기반으로 해석해 봤을 때, 이상의 결과는 고래 1-1공 시료가 상대적으로 모세관력이 강하다는 것을 의미한다. 특히 모세관력이 강한 시스템에서 최소잔류수포화율이 높게 나타난 것은 앞서의 포화율에 대한 논의와도 잘 일치한다.

두 시료의 실험 결과는 열처리 후의 결과로, 현장 적용을

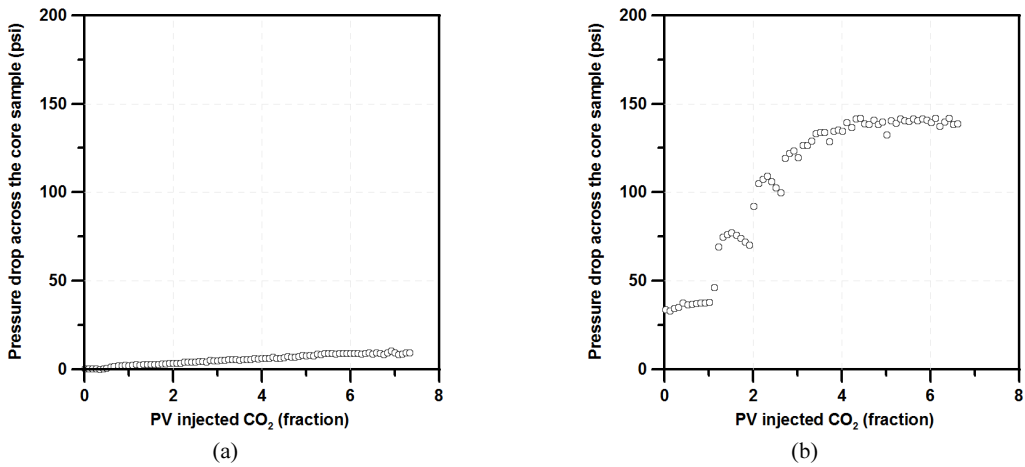


Fig. 5. Results of pressure drop after firing (a) Paaratte sample (b) Gorae 1-1 sample.

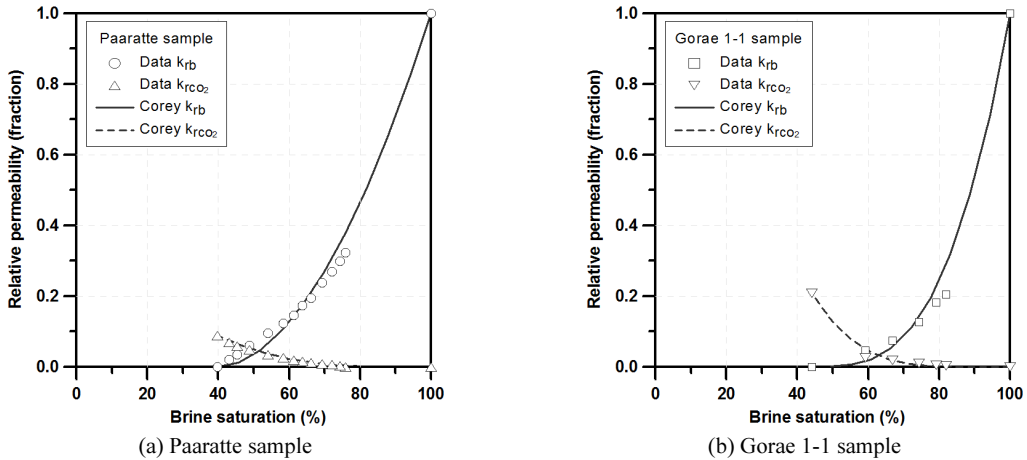


Fig. 6. Results of CO₂/brine relative permeability measurements.

Table 3. Wettability criteria and analogy to this study(Craig, 1971)

Criteria	Water-wet*	Oil-wet*	Experimental results	
			Paaratte	Gorae 1-1
1. S_{wirr}	> 20 to 25%	< 15%, usually 10%	39%	42%
2. $k_{rw} = k_{rmw}$	at $S_w > 50\%$	at $S_w < 50\%$	52%	62%
3. k_{rw} at S_{mw}	< 0.3	> 0.5, approaching 1.0	0.323	0.205

Table 4. Corey exponents for brine and CO₂ obtained in this study

Rock sample	Corey exponent	
	Brine	CO ₂
Paaratte	1.9	3.0
Gorae 1-1	3.2	4.3

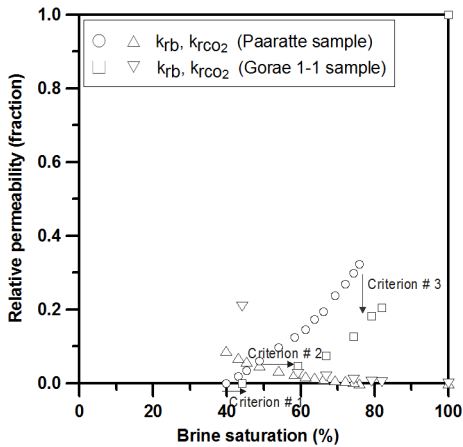


Fig. 7. Application of wettability criteria to the results in this study.

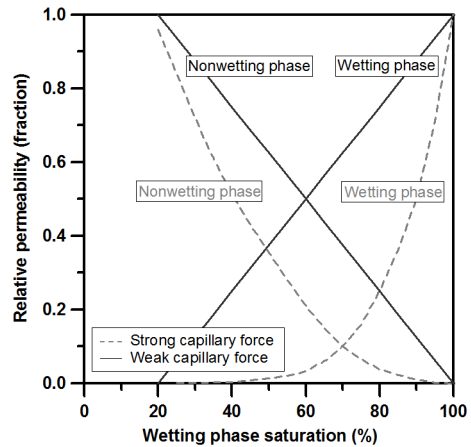


Fig. 8. Relation between capillary force and relative permeability curves(Dullien, 1992; Lake *et al.*, 2014).

직접적으로 설명하기에는 불확실성을 일부 내포하고 있다. 그러나 측정된 실험 결과를 기반으로 각 시료를 취득한 지층에서 CO₂ 주입을 예측한다면, 고래 1-1공 시료는 낮은 절대유체투과도, 모세관 지배 유동으로 인해 해당 지층으로의 CO₂ 주입은 paaratte 지층보다 상대적으로 비효율적이라는 것을 예상할 수 있다. 이 지층에 CO₂를 주입한다면, 앞서 설명한 시료의 특성을 고려하여 현장 시험과 주입 계획을 설정해야 할 것이다. 특히 CO₂ 유동과 저장용량을 높이기 위해서는 해당 지층으로 주입된 CO₂가 모세관력을 극복할 수 있도록 주입 유량을 높게 유지하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

결론

CO₂/염수 상대유체투과도는 포화율 분포에 따른 각 상들의 유효유체투과도를 제시하기 때문에 실증 사업에서 중요한 자료로 활용된다. 본 연구에서는 호주 오토웨이 분지 paaratte 지층의 시료와 국내 대륙봉 고래 1-1공에서 채취된 시료를 대상으로 CO₂/염수 상대유체투과도를 측정하였다. 두 시료 모두 열처리로 인한 불확실성을 내포하고 있지만 실험 결과로부터 다음의 결론을 도출할 수 있다.

1. paaratte 지층의 시료에서는 미세 점토광물의 영향으로 열처리 전과 후의 압력차가 2~3배 차이 나는 것을 확인하였다. 이러한 압력차는 주입도에 영향을 미칠 수 있으므로, 해당 지층으로 CO₂ 주입 시 이를 고려하여 계획해야 한다.
2. CO₂와 염수의 상대유체투과도 측정 결과, 두 시료 모두 0.2 이하의 낮은 CO₂ 끝점 상대유체투과도와 약 40% 이상의 높은 최소잔류수포화율과이 나타났다. 높은 최소

잔류수포화율은 물·오일 상대유체투과도 곡선의 최소 잔류수포화율과 대비되며, 두 시료의 최소잔류수포화율 차이는 습윤성 차이로 설명된다. 특히 고래 1-1공 시료에서는 높은 최소잔류수포화율로 인해 CO₂ 주입량을 paaratte 지층보다 보수적으로 산정해야 한다.

3. 고래 1-1공 시료는 paaratte 지층의 시료에 비해 낮은 절대유체투과도와 모세관 지배 유동으로 인해 비효율적 CO₂ 주입이 예상된다. 따라서 해당 지층으로 주입된 CO₂가 모세관력을 충분히 극복할 수 있도록 CO₂ 주입 유량을 높게 유지해야 한다.

Nomenclature

- f_{CO_2} : fractional flow of CO₂, fraction
- k_a : absolute permeability, md
- k_{rb} : relative permeability of brine, fraction
- k_{rCO_2} : relative permeability of CO₂, fraction
- k_{rw} : relative permeability of wetting phase, fraction
- k_{rnw} : relative permeability of non-wetting phase, fraction
- N_w : Corey exponent of wetting phase
- N_{nw} : Corey exponent of non-wetting phase
- p : pressure, psi
- p_r : reservoir pressure, psi
- p_{wf} : bottomhole pressure, psi
- S_{wirr} : irreducible water saturation, %
- S_w : water saturation, %
- S_w^* : effective water saturation, fraction

- q_{inj} : injection rate, stb/d
 μ_{brine} : viscosity of brine, cp
 μ_{CO_2} : viscosity of CO₂, cp

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. 20158510000010). 이에 감사드립니다. 오프웨이 paaratte 시료를 제공해 준 호주 CO2CRC에 감사드립니다.

References

- Bachu, S., 2003. Sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change: Capacity of deep saline aquifers to sequester CO₂ in solution. *Energy Conversion and Management*, 44(20), 3151-3175.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., and Mathiassen, O.M., 2007. CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International J. of Greenhouse Gas Control*, 1(4), 430-443.
- Bennion, B. and Bachu S., 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas, Texas, USA, SPE-95547-MS.
- Bennion, B. and Bachu, S., 2006. Supercritical CO₂ and H₂S-brine drainage and imbibition relative permeability relationships for intergranular sandstone and carbonate formations. *SPE Europe/EAGE Annual Conference*, Vienna, Austria, SPE-99326-MS.
- Bennion, B. and Bachu, S., 2008. Drainage and imbibition relative permeability relationships for supercritical CO₂/brine and H₂S/brine systems in intergranular sandstone carbonate shale and anhydrite rocks. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 11(3), 487-496.
- Bradshaw, J., Bachu, S., Bonijoly, D., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., and Mathiassen, O.M., 2007. CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International J. of Greenhouse Gas Control*, 1(1), 62-68.
- Brooks, R.H. and Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. *Hydrology Papers* 3, Colorado, USA, p.1-27.
- Burdine, N. T., 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. *J. of Petroleum Technology*, 5(3), 71-78.
- Choi, B.Y., Shinn, Y.J., Park, Y.C., Park, J.Y., Kwon, Y.K., and Kim, K.Y., 2017. Simulation of CO₂ injection in a small-scale pilot site in the Pohang Basin, Korea: Effect of dissolution rate of chlorite on mineral trapping. *International J. of Greenhouse Gas Control*, 59, 1-12.
- Corey, A.T., 1954. The interrelation between gas and oil relative permeabilities. *Producers Monthly*, 19(1), 38-41.
- CO2CRC Building a Low Emissions Future, 2017.10.04, <http://www.co2crc.com.au/>.
- Craig, F.F., 1971. *The Reservoir Engineering Aspects of Waterflooding*, Vol. 3, SPE Monograph Series, Richardson, Texas, USA, p.12-44.
- Crocker, M. E., Donaldson, E.C., and Marchin, L.M., 1983. Comparison and analysis of reservoir rocks and related clays. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, San Francisco, California, USA, SPE-11973-MS.
- Dullien, F.A.L., 1992. *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure (2nd edition)*, Academic Press, San Diego, USA, p.355-385.
- Fatt, I. and Dykstra, H., 1951. Relative permeability studies. *J. of Petroleum Technology*, 3(9), 249-256.
- Geary, G.C. and Reid, I.S.A., 1998. *Hydrocarbon Prospectivity of the Offshore Eastern Otway Basin*, Department of Natural Resources and Environment, Melbourne, Australia, p.110.
- Hayatdavoudi, A. and Ghalambor, A., 1996. Controlling formation damage caused by kaolinite clay minerals: Part I. *SPE Formation Damage Control Symposium*, Lafayette, Louisiana, USA, SPE-31118-MS.
- IPCC, 2005. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. IPCC Special Report, New York, USA, p.3-16.
- Jeong, G.S., Lee, J.H., Ki, S.I., Huh, D.G., and Park, C.H., 2017. Effects of viscosity ratio, interfacial tension and flow rate on hysteric relative permeability of CO₂/brine systems. *Energy*, 133, 62-69.
- Krevor, S.C.M., Pini, R., Li, B., and Benson, S.M., 2011. Capillary heterogeneity trapping of CO₂ in a sandstone rock at reservoir conditions. *Geophys. Res. Lett.*, 38(15), L15401.
- Lake, L., Johns R.T., Rossen, R., and Pope, G.A., 2014. *Fundamentals of Enhanced Oil Recovery*, Society of Petroleum Engineers, Texas, USA, p.83-88.
- Ma, S. and Morrow, N.R., 1994. Effect of firing on petrophysical properties of berea sandstone. *SPE Formation Evaluation*, 9(3), 213-218.
- Musharova, D., Mohamed, I., Hisham A., and Nasr, E.D., 2012. Detrimental effect of temperature on fines migration in sandstone formations. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana, USA, SPE-150953-MS.
- National Institute for Standards and Technology(NIST) Chemistry Webbook, SRD 69. 2017.10.04, <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.

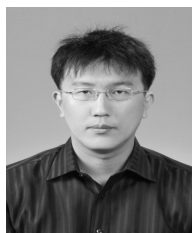
- Park, Y.C., Huh, D.G., Yoo, D.G., Hwang, S.H., Lee, H.Y., and Roh, E., 2009. A review of business model for CO₂ geological storage project in Korea. *J. of the Geological Society of Korea*, 45(5), 579-587.
- Perrin, J.C. and Benson, S., 2010. An experimental study on the influence of sub-core scale heterogeneities on CO₂ distribution in reservoir rocks. *Transp. Porous Media*, 82(1), 93-109.
- Perrin, J.C., Krause, M., Kuo, C.W., Milijakovic, L., Chabora, E., and Benson, S.M., 2009. Core-scale experimental study of relative permeability properties of CO₂ and brine in reservoir rocks. *Energy Procedia*, 1(1), 3515-3522.
- Richardson, J.G., Kerver, J.K., Hafford, J.A., and Osoba, J.S., 1952. Laboratory determination of relative permeability. *Trans. AIME*, 4(8), 187-196.
- Priisholm, S., Nielsen, B.L., and Haslund, O., 1987. Fines migration, blocking, and clay swelling of potential geothermal sandstone reservoirs, Denmark. *SPE Formation Evaluation*, 2(2), 168-178.
- Pini, R. and Benson, S.M., 2013. Simultaneous determination of capillary pressure and relative permeability curves from core-flooding experiments with various fluid pairs. *Water Resour. Res.*, 49(6), 3516-3530.
- Shinn, Y.J., Yoo, D.G., Hwang, S.h., Park, Y.C., and Huh, D.G., 2012. A preliminary screening of CO₂ geological storage in Ulleung Basin, Korea. *J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng.*, 49(1), 47-58.
- Ulusay, R., Aydan, O., Gercek H., Hindistan, M.A., and Tuncay, R., 2016. *Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future*, CRC Press, Leiden, Netherland, p.107-110.



정 구 선

2010년 경기대학교 토목환경공학부 공학사
 2017년 과학기술연합대학원대학교 공학박사

현재 한국석유공사 E&P사업본부 북미사업처
 (E-mail; gusun.jeong@knoc.co.kr)



기 세 일

2000년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학사
 2002년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사
 2007년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학박사

현재 한국석유공사 E&P사업본부 E&P기술처
 (E-mail; seil.ki@knoc.co.kr)

허 대 기

현재 가스하이드레이트 개발사업단 단장
 (本 學會誌 第54卷 第2号 參照)

박 용 찬

현재 한국지질자원연구원 전략기술연구본부 CO₂지중저장연구단 책임연구원
 (本 學會誌 第53卷 第5号 參照)